

Suivi par capteur à fibre optique du procédé Resin Transfer Moulding (RTM)

Monitoring the Resin Transfer Moulding process by optical fiber sensor

Marc WARIS¹, Blandine TORTECH², Emmanuel MARIN², Alain VAUTRIN¹

1 : Département Mécanique et procédés d'élaboration, LTDS UMR 5513
Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne
158, cours Fauriel 42023 Saint-Etienne
e-mail : waris@emse.fr

2 : Université de Lyon, F-42023, Saint-Etienne, France,
CNRS UMR 5516, Laboratoire Hubert Curien, F-42000, Saint-Etienne, Université Jean-Monnet de Saint-Etienne

Résumé

Le procédé Resin Transfer Moulding (RTM) est un procédé en moule fermé couramment utilisé pour la fabrication de pièces avec des géométries complexes. Ce procédé est adapté pour la fabrication de pièces avec des performances mécaniques très élevées, et un bon état de surface final. Cependant ces avantages sont contrastés par des problèmes de fabrication, comme la formation de zones sèches et de contraintes résiduelles. Ces problèmes peuvent conduire à une diminution des propriétés mécaniques de la pièce allant jusqu'à une pièce non-conforme, et augmentant ainsi le coût de fabrication d'une pièce en matériau composite. D'où la nécessité pour les industriels d'avoir un suivi du procédé, dans le but d'améliorer la qualité des pièces, et ainsi réduire le coût de fabrication.

Dans cette étude, nous avons développé une méthodologie permettant de suivre le procédé RTM par capteur à fibre optique. Cette méthodologie a été appliquée dans le cadre de l'élaboration d'un panneau de faible épaisseur en carbon/époxy. L'intérêt de l'utilisation des capteurs à fibre optique est d'accéder à des paramètres physiques de la pièce, au cours du procédé d'élaboration. En effet ces capteurs sont sensibles à la température, aux déformations, et au degré de réticulation. Il est donc possible d'avoir des informations de l'influence des paramètres procédés (cycle thermique, pression/débit d'injection, matériau du moule) sur la qualité de la pièce finale. Dans le futur, cette démarche permettra aux ingénieurs d'optimiser les conditions d'élaboration, et ainsi contribuera à diminuer le temps et le coût de développement de pièces industrielles complexes.

Abstract

The resin Transfer Moulding (RTM) is a closed mould process widely used in order to manufacture composite parts with complex shape. This process is interesting to manufacture part with high mechanical performance and a good final net shape. However these advantages are contrasted by some quality problems such as dry spots formation and residual stresses. These problems can drop the mechanical properties of the part and then lead to increase the cost of the manufacturing process. Hence the importance for the industrials to monitor the process in order to enhance the quality of the part, and in the same way to reduce the cost of fabrication.

In this study we have developed a methodology to monitor RTM Process by optical fiber sensor. This methodology was applied for the case of manufacturing thin plate in carbon/epoxy. The interest to use optical fiber sensors is to achieve physical parameters measurement during the elaboration process. In fact optical fiber sensors are sensitive to several parameters such as the temperature, the strain, degree of cure. Therefore it is possible to get information about the influence of process parameters (thermal cycle, pressure/rate of injection, mould material) on the quality of the final part. In the future, this approach will help engineers to optimize the elaboration conditions, and thus reduce the time and the cost for the development of new industrial parts with complex shape.

Mots Clés : Procédé d'élaboration des composites, monitoring du procédé RTM, capteur à fibre optique

Keywords: Composite manufacturing process, monitoring RTM process, optical fiber sensor

1 Introduction

Durant ces dernières années, la proportion de matériaux composites hautes performances ne cesse d'augmenter dans divers secteurs industriels, tel que l'aéronautique, l'automobile et le génie civil. Aujourd'hui l'industrie s'oriente vers la fabrication de pièces toujours plus complexe, en termes de géométrie mais aussi de constituant. Le procédé « Resin Transfer Moulding » (Cf. Fig. 1) est particulièrement adapté à la production de pièce complexe, avec une relative bonne cadence de production (5000 pièces/an). De plus, ce procédé a l'avantage de réaliser des pièces avec de bonnes caractéristiques mécaniques et dimensionnelles, ainsi qu'un bon état surface.

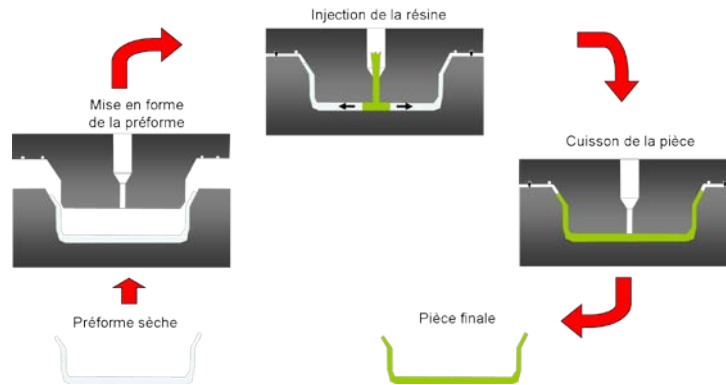


Fig. 1 Schéma de principe du procédé RTM

Néanmoins, le procédé RTM met en jeu des phénomènes mécanique, thermique et physico-chimique couplés simultanément. Il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance de ces phénomènes pour garantir la fabrication de pièces complexes et ainsi diminuer le coût d'élaboration. La maîtrise du procédé passe par le développement des modèles numériques liés au procédé, mais aussi par le *monitoring* du procédé. Cette dernière étape est indispensable pour la fabrication de pièces complexes, car chaque pièce produite a un caractère unique. En effet, les étapes nécessaires à la fabrication, telles que par exemple la découpe et le drapage de la préforme, peuvent engendrer une variabilité des caractéristiques de la préforme, qui vont perturber l'écoulement de la résine à travers la préforme lors du remplissage. C'est pourquoi il est indispensable de coupler les modèles numériques à des caractéristiques mesurées sur le procédé en temps réel. Ces mesures peuvent être utiles pour valider les modèles ou pour contrôler le procédé.

Les récents développements de la technologie des capteurs à fibre optique ont démontré leurs capacités à fournir des informations clef sur l'état mécanique d'une pièce en matériaux composites. En effet, du fait de leurs géométries et de leurs dimensions, ces capteurs peuvent être insérés *in situ* à l'intérieur des structures au cours du procédé d'élaboration. Ces capteurs permettent donc, non seulement, de suivre les caractéristiques mécaniques et physiques lors du procédé d'élaboration, mais aussi au cours de la vie de la structure. Ils sont très riches en information, car ils peuvent mesurer de nombreuses informations dont notamment la température, la progression du front de résine, le retrait chimique, le degré de cuisson et les déformations. Ces capteurs ont déjà fait l'objet de nombreuses applications pour l'étude de la mise en œuvre des pré-imprégnés et des procédés d'infusion [1-5], où l'accès à la préforme est facilité par l'utilisation d'une bache à vide. Ce n'est que plus récemment, que des études ont été menées sur le procédé RTM [6-8].

Dans cette étude on s'intéresse à l'instrumentation du procédé RTM par capteur à fibre optique. Le but est de mettre en place une méthodologie de mise en œuvre des capteurs, afin d'étudier l'influence des paramètres d'entrée du procédé sur la qualité de la pièce finale, à travers la réalisation de pièces références. Pour ce faire, il est nécessaire de développer un outillage RTM spécifique permettant l'insertion des capteurs à travers des parois rigides.

On présentera ici nos premiers résultats du monitoring du procédé RTM, dans le cadre de l'élaboration d'un panneau de faible épaisseur en carbone/époxy. Le panneau est instrumenté par un capteur Fiber Bragg Grating (FBG) et un thermocouple placé au milieu du panneau. Il est ainsi

possible de suivre les évolutions de température et de déformation au cours du procédé RTM. Une dernière partie sera consacrée aux perspectives liées à l'utilisation de cette méthodologie et au développement d'un capteur à fibre optique permettant de déterminer simultanément température et déformation.

2 Capteur à fibre optique Fiber Bragg Grating (FBG)

Les capteurs à fibre optique à réseau de Bragg sont réalisés, en créant une variation locale de l'indice de réfraction de la fibre optique. Celle-ci est obtenue grâce à une insolation d'une fibre photosensible (hydrogénée) par un laser UV.

Lorsqu'une onde lumineuse issue d'une source large bande est transmise dans un réseau de Bragg, une seule longueur d'onde est réfléchie, alors que toutes les autres sont transmises (cf. Fig. 2). La longueur d'onde réfléchie correspond à la longueur d'onde de Bragg et est notée λ_B . Elle est proportionnelle au pas du réseau Λ , à l'indice effectif de réfraction n_{eff} de la fibre optique.

La longueur d'onde de Bragg est donnée par :

$$\lambda_B = 2.n_{eff}.\Lambda \quad (\text{Eq. 1})$$

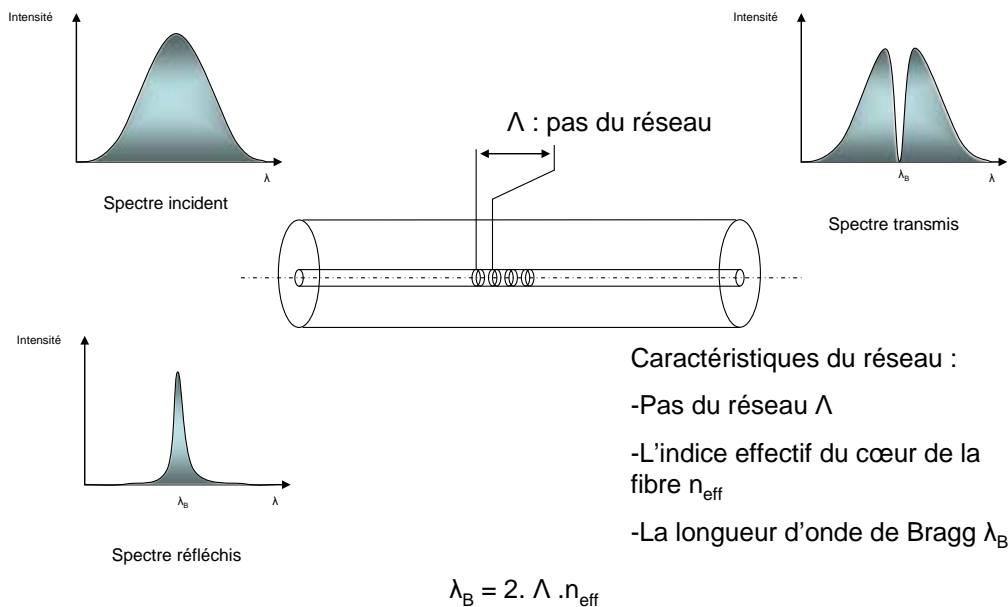


Fig. 2 Principe des réseaux de Bragg

Les fibres optiques à réseaux de Bragg sont généralement utilisées pour la mesure de déformation mécanique et de température. En effet, la longueur d'onde de Bragg dépendant de l'indice de réfraction effectif de la fibre et du pas du réseau, tout phénomène extérieur qui influe sur ces paramètres conduit à une modification de la longueur d'onde réfléchie.

Ainsi, en différenciant l'équation 1 par rapport à la température et à la déformation, on peut exprimer la variation de longueur d'onde de Bragg $\Delta\lambda_B$ par rapport à une variation de température ΔT et de déformation $\Delta\epsilon$ sous la forme suivante :

$$\Delta\lambda_B = K_T\Delta T + K_\epsilon\Delta\epsilon \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec K_T et K_ϵ respectivement les coefficients de sensibilité à la température et à la déformation du FBG. Ces coefficients sont déterminés pour chaque FBG sur un banc de calibration. Pour le FBG utilisé dans cette étude, on a $K_T = 10.98 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ et $K_\epsilon = 1.25 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

3 Application au procédé RTM

3.1 Le procédé RTM

On s'intéresse ici au suivi du procédé RTM par capteur à fibre optique, dans le cadre de l'élaboration d'un panneau de faible épaisseur ($E_p = 4$ mm). La pièce en carbone/époxy de dimension 430x430x4 mm est réalisée par une injection périphérique à débit constant. La préforme est constituée de 12 plis en fibre de carbone (tissu G0986), avec un taux volumique de fibre (Tvf) théorique de 60%.

Les plis sont empilés avec la séquence suivante $[0/90]_{12}$. Une fibre optique SMF28 comportant un réseau de Bragg est placée au milieu de la pièce, à l'interface entre le 6ième et 7ième pli. Un micro thermocouple est inséré à proximité, afin d'effectuer la compensation en température.

La préforme ainsi constituée est ensuite insérée dans un moule en aluminium. Après avoir compacté la préforme à l'aide d'une presse, on effectue ensuite une phase de débullage à 100°C (phase 1), afin d'enlever l'air qui peut être emprisonnée à l'intérieur de la préforme. La résine époxy RTM6 est préchauffée à 80°C, puis injectée à une viscosité minimale dans le moule chauffée à 120°C (phase 2). Le temps d'injection pour ce type de pièce est d'environ 10 min.

Le matériau est par la suite consolidé lors d'une cuisson à 180°C pendant 1h (phase 3, cycle recommandé par le fabricant de la résine Hexcel). Les moules sont ensuite refroidis à température ambiante.

La figure 3 synthétise le cycle thermique type des différentes phases du procédé RTM.

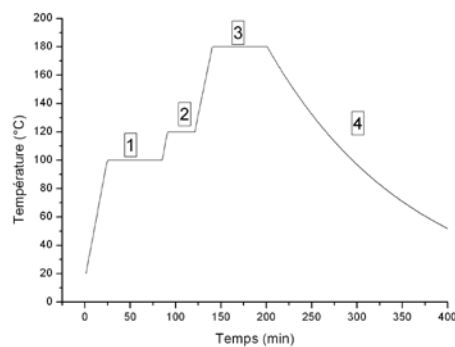


Fig. 3 Cycle thermique RTM

3.2 Insertion et intrusivité des capteurs

Un point important pour la réalisation de ce type d'essai est le positionnement du capteur et de la fibre optique dans la préforme. Comme le montre de nombreux auteurs, il est primordial de placer la fibre optique le long des fibres de carbone qui constituent le renfort. Cela permet de réduire l'intrusivité du capteur, car dans ce cas l'intrusivité se limite uniquement au diamètre de la fibre optique (125µm). Au contraire, lorsque la fibre est désalignée avec les fibres de renfort, on a la création d'une zone riche en résine qui est maximale pour un angle de 90° entre la fibre optique et la fibre de carbone [9] (Cf. Fig. 4).

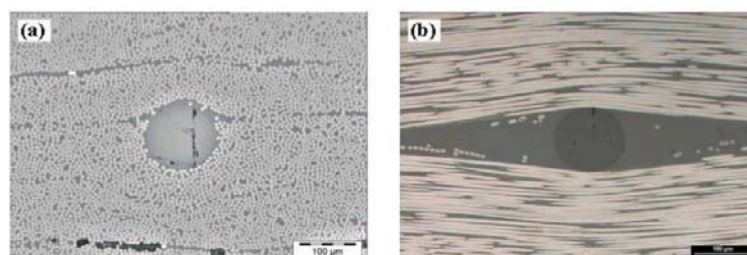


Fig. 4 Insertion du FBG a) parallèle aux fibres de carbone b) perpendiculaire aux fibres de carbone [10]

De plus, l'alignement des fibres optiques avec les fibres du renfort joue un rôle important pour la bonne réalisation de l'essai et le post traitement des données. En effet, lorsque le T_{vf} devient important le renfort induit beaucoup de micro courbures à la fibre optique. La conséquence directe est un affaiblissement du signal, qui peut conduire à une perte de l'information. Ce phénomène est d'autant plus sensible que l'on a un nombre d'enchevêtrements important, tel que dans le cadre de l'utilisation d'un tissu comme renfort. On peut donc être amené à diminuer le T_{vf} pour réduire l'affaiblissement du signal.

Le traitement de l'information peut être aussi amélioré en utilisant un modèle mécanique, qui permet de tenir compte de l'influence de l'inclusion dans le matériau composite, et ainsi d'avoir une détermination du champ de déformation dans le matériau en l'absence de capteur. Cette approche nécessite la considération d'un milieu homogène, ce qui impose donc un alignement de la fibre optique avec les fibres de renfort. On peut calculer l'état de contrainte résiduelle lié à la présence d'une fibre optique dans un matériau composite, et montrer que celle-ci devient négligeable à une distance équivalente à 3 fois le diamètre de la fibre optique (Cf. Fig. 5). En pratique cela se réalise en intégrant la fibre optique au milieu de 6 plis unidirectionnels UD, pour un composite à fibre de carbone, résine époxy haute performance.

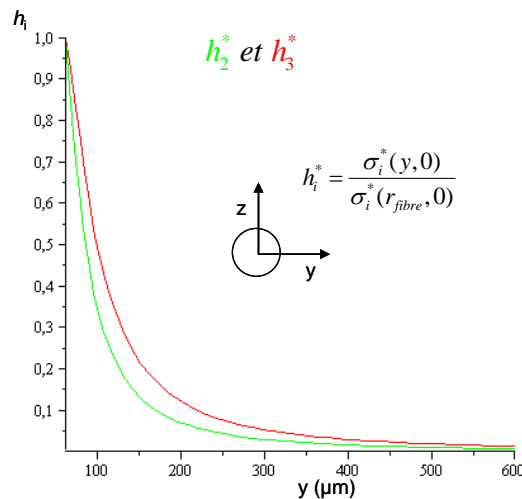


Fig. 5 Evolution de la contrainte normalisé induite par la fibre optique

3.3 Outillage spécifique

Un outillage spécifique a été développé afin de permettre le passage des capteurs à travers la paroi rigide des moules. L'insertion se fait par l'intermédiaire de passages étanches sur le principe du presse-étoupe. Cette solution technologique est rapportée sur le cadre métallique, ce qui nous permet de calibrer l'épaisseur du panneau réalisé, et de positionner les capteurs dans la préforme. Ce moule permet en plus de réaliser des pièces avec différentes géométries, en simplement changeant le type de cadre.

Le moule de cette étude est usiné dans un alliage d'aluminium (Cf. Fig. 6).

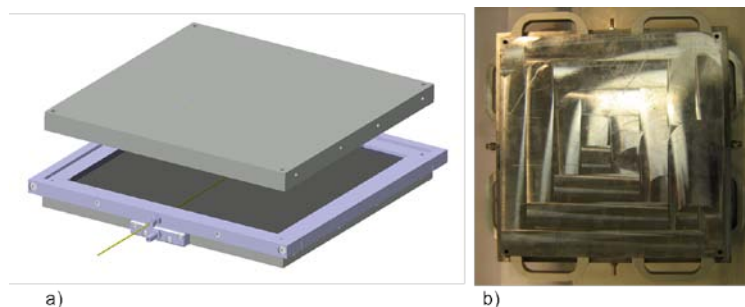


Fig. 6 Outillage RTM spécifique a) modèle 3D b) Moule RTM

Cette première version de moule, nous permet de réaliser des mesures in situ dans la pièce au cours du procédé de fabrication RTM, tout en garantissant l'étanchéité du moule. Ce qui est un paramètre important dans le but de réaliser des pièces conformes. C'est-à-dire des pièces respectant à la fois les tolérances dimensionnelles, le taux volumique de fibre et un taux de porosité inférieur à 3%.

3.4 Monitoring du procédé RTM

3.4.1 Evolution de la longueur d'onde de Bragg

La figure 7 présente les variations de longueur d'onde de Bragg issues du FBG, ainsi que la température relevée par le thermocouple à proximité du capteur, lors de la cuisson et du refroidissement de la pièce.

Durant la phase d'injection, on aurait pu s'attendre à une variation de longueur d'onde ou de température au passage du front de résine, du fait de la différence de température entre la résine et la préforme préchauffée respectivement à 80°C et 120°C. Néanmoins on n'a pas noté d'évolutions significatives des paramètres mesurés. C'est pourquoi la phase d'injection n'apparaît pas sur le graphique. Cela peut s'expliquer par l'apport en chaleur du moule lors du passage de la résine dans le canal d'injection. Il semblerait que la température de la résine soit proche de la température du moule au moment de l'imprégnation des renforts. Dès lors il ne nous est pas possible de détecter le passage du front de résine à proximité du capteur.

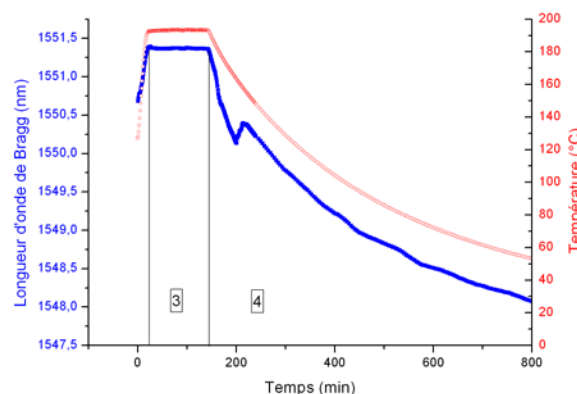


Fig. 7 Evolution du champ de température et de la longueur d'onde du Bragg au centre de la pièce

Lors de la montée en température, nécessaire pour atteindre la température de cuisson du matériau, la longueur d'onde augmente quasi linéairement avec la température, en raison de la sensibilité thermique du capteur. Ensuite, durant la phase de cuisson, la température est maintenue constante (palier de cuisson recommandé par Hexcel). On constate que la longueur d'onde de Bragg reste constante.

Lors du refroidissement on remarque une discontinuité aux alentours des 220 min qui correspond physiquement à la décohésion entre le moule et la pièce.

3.4.2 Evolution de la déformation *in situ*

L'équation 2 permet, à partir de la variation de longueur d'onde de Bragg, de déterminer la déformation au cœur du matériau composite au cours de la phase de cuisson et de refroidissement. Cette détermination se fait sous l'hypothèse d'un champ de contrainte uniaxiale appliqué au FBG. Cette hypothèse simplificatrice est couramment utilisée pour estimer la déformation, car elle est simple à mettre en place et donne une valeur de déformation quasi instantanément.

Elle se justifie ici, par le drapage employé qui limite la formation d'efforts transverses sous l'effet d'une sollicitation thermique. Cela est confirmé par l'absence de phénomène de biréfringence sur le

spectre du FBG. Il est à noter que l'on pourrait faire un essai de traction, post fabrication, pour conforter cette hypothèse [11].

La figure 8 représente l'évolution de la déformation in situ dans la pièce. On remarque que la déformation reste constante lors de la phase de cuisson, ainsi on ne relève pas d'influence du retrait chimique de la résine, sur la réponse du capteur.

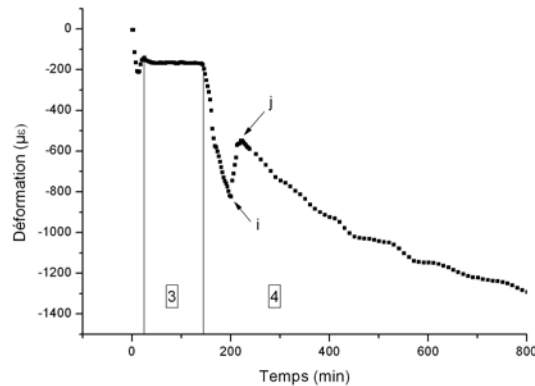


Fig. 8 Déformation lors de la phase de cuisson (3) et de refroidissement (4)

Durant la phase de refroidissement on note une déformation négative qui correspond au retrait thermique d'un matériau composite. Bien entendu, on retrouve la discontinuité relevée précédemment sur la longueur d'onde qui est engendrée par la décohésion entre le moule et la pièce composite. Cela s'explique par la différence des coefficients de dilatation thermique entre la pièce composite ($1 \text{ à } 5 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$) et le moule aluminium ($24.6 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$). Cette décohésion a lieu pour une température de 155°C (Cf. Fig. 9).

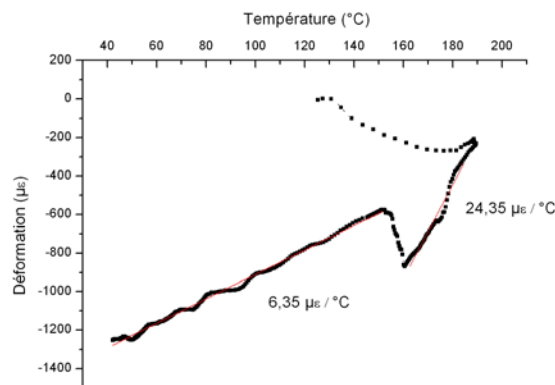


Fig. 9 Déformation au centre de la pièce en fonction de la température

Cette hypothèse est confirmée par un changement de pente de la courbe de refroidissement avant et après la température de décohésion. Avant cette température, on relève une pente de $24.35 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$, puis qui passe à $6.35 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ après cette température. Ces valeurs sont proches respectivement du coefficient de dilatation thermique du moule aluminium et d'un matériau composite. Ainsi tout laisse à penser qu'il y a, malgré l'usage de démoulant, une adhésion du moule et la pièce lors de la première phase de refroidissement. Dans cette phase le moule induit un état de compression dans la pièce, du fait de la différence de coefficient de dilatation thermique. Dès lors que la contrainte de cisaillement de l'interface moule/pièce dépasse la contrainte d'adhésion entre la résine et le moule on a décohésion du moule et de la pièce, et par suite relâchement de l'état de compression du composite. Après la décohésion on retrouve principalement le comportement thermique d'un matériau composite. Ce phénomène est identique à celui observé dans le cadre de la mise en œuvre par autoclave comme l'a montré Twigg [12]. En fin de refroidissement, il subsiste une déformation résiduelle de compression dans le matériau d'environ $1200 \mu\epsilon$.

Ces résultats montrent l'intérêt d'une telle instrumentation dans le cadre du suivi du procédé. En effet, à partir de ces informations il est possible d'avoir une mesure en temps réel de l'influence des conditions d'élaboration sur la qualité de la pièce fabriquée. Ces capteurs peuvent être utilisés comme outils de contrôle de la santé matière pour l'optimisation et le développement de nouvelles pièces.

De plus, ces informations peuvent être couplées à des modèles numériques afin de les valider [6], dans le cadre de la prédiction des contraintes résiduelles, ou d'identifier des paramètres clés de modèles, permettant ainsi d'avoir une modélisation plus précise des phénomènes qui sont mis en jeux lors de l'élaboration de matériaux composites.

4 Perspective

4.1 Découplage Température déformation (Dual Bragg Grating Method)

Comme, nous l'avons vu dans la partie 2, pour déterminer la déformation au bord du FBG, il est nécessaire de faire une compensation en température. Celle-ci est généralement effectuée par l'utilisation d'un thermocouple. Ainsi à chaque FBG il faut en théorie associer un thermocouple. Dans le cadre de plusieurs mesures cela complique l'instrumentation et augmente considérablement l'intrusivité.

Il est possible d'améliorer l'instrumentation en effectuant un découplage à partir deux réseaux inscrits côte à côte sur la même fibre optique, ayant des sensibilités aux deux paramètres différentes. C'est le principe de la méthode Dual Bragg Grating appliqué par Shu [13] à des FBG de Type IA et IIA. Ces types de FBG sont des réseaux obtenus avec des longues périodes d'insolation UV. Cela permet d'avoir des sensibilités thermiques suffisamment différentes pour inverser la matrice K du système suivant :

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = [K] \cdot \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} \text{ Avec } K = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{\varepsilon1} \\ K_{T2} & K_{\varepsilon2} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3})$$

K_T et K_ε les sensibilités respectives par rapport à la température et à la déformation de chaque FBG (Tab. 1).

Type FBG	$K_T(\text{pm}/^\circ\text{C})$	$K_\varepsilon(\text{pm}/\mu\varepsilon)$
FBG I	9.28	1.24
FBG IA	9.37	1.24
FBG IIA	9.87	1.27

Tab. 1 Sensibilités des différents FBGs

Il est ainsi possible de déterminer simultanément température et déformation à partir des deux variations de longueurs d'ondes données par les deux FBGs, en inversant la relation (Eq. 3).

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{pmatrix} = \frac{1}{K_{\varepsilon2} \cdot K_{T1} - K_{T2} \cdot K_{\varepsilon1}} \cdot \begin{bmatrix} K_{\varepsilon2} & -K_{\varepsilon1} \\ -K_{T2} & K_{T1} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 4})$$

Généralement on utilise la valeur du déterminant de la matrice de sensibilité K est un indicateur de performance du découplage. Le découplage sera d'autant meilleur que le déterminant sera grand. L'un des critères utilisé pour l'évaluation de la qualité du découplage, est lié à l'étude de la propagation d'erreur du système [14]. On peut ainsi évaluer l'erreur sur la détermination de la

température et de la déformation en fonction de l'erreur induite par la mesure de la longueur d'onde Bragg.

Notre système d'interrogation nous permet, à l'heure actuelle, d'atteindre au mieux une précision de 1 pm sur la détermination de λ_B , en négligeant les incertitudes de détection du pic de Bragg.

Au vu de nos premiers résultats, on peut donc espérer une précision de 5°C et 40 $\mu\epsilon$ sur la détermination respectivement de la température et de la déformation (Tab. 2).

Schéma de découplage	Erreurs température (°C/pm)	Erreurs déformation ($\mu\epsilon$ /pm)
FBG I / FBG IIA	5	40
FBG IA / FBG IIA	7	60

Tab. 2 Erreurs théoriques sur le découplage

Ces premiers résultats sont prometteurs, car on peut envisager, par l'intermédiaire de cette technique, de réaliser des mesures en plusieurs endroits de la pièce, en multiplexant des capteurs sur la même fibre optique. Ainsi cela permettrait d'avoir une mise en place des capteurs plus aisée, ainsi qu'une réduction considérable de l'intrusivité des capteurs. Néanmoins, il est encore nécessaire de développer la fabrication des FBG type IA et IIA, afin d'améliorer la différence de sensibilité thermique entre ces deux types de FBG.

Conclusion

Dans cette étude, nous avons montré la faisabilité de l'instrumentation du procédé RTM par capteur à fibre optique. En effet, malgré l'environnement hostile du procédé il est possible de suivre des paramètres physiques, in situ dans le matériau composite, au cours de sa fabrication. Ce type d'instrumentation requiert une méthodologie rigoureuse afin de garantir le bon déroulement de l'essai, tant pour l'insertion, que pour l'interprétation des résultats. Le positionnement du capteur par rapport aux fibres de renfort joue un rôle important pour la réduction de l'intrusivité.

La mise en place d'une instrumentation par FBG donne accès au suivi de déformation, lors des différentes phases du procédé RTM. En particulier il est possible d'avoir une estimation de la déformation induite par l'interaction moule pièce lors du refroidissement. Cette valeur peut être très utile en vue de l'identification des paramètres d'interface moule pièce, nécessaires à l'amélioration de la modélisation du procédé, comme la prédiction des contraintes résiduelles.

L'intrusivité du capteur peut être encore réduite par l'utilisation de FBG type IA et IIA pour le découplage température et déformation. Cette technique s'avère d'autant plus intéressante que l'on cherche à faire des mesures à différentes positions d'une pièce. Les premiers résultats sont encourageants quant à la précision qu'il est possible d'atteindre en température et déformation avec la méthode Dual Bragg Grating, mais nécessite encore une amélioration de la fabrication des FBG IA et IIA.

Enfin, les solutions technologiques apportées pour l'insertion des fibres optiques, permettent d'envisager raisonnablement l'insertion de FBG dans des applications industrielles, pour l'étude et le développement de pièces complexes, tout en garantissant une bonne étanchéité des moules.

Les capteurs à fibre optique apparaissent donc comme un outil prometteur pour l'optimisation des paramètres procédés, et ainsi une diminution des coûts de développement, spécialement dans le cadre du développement de pièces complexes.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet national LCM Smart piloté par l'entreprise Hexcel. Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des partenaires de ce projet.

Références

- [1] Y. Okabe, S. Yashiro, R. Tsuji, T. Mizutani, N. Takeda, "Effect of thermal residual stress on the reflection spectrum from fiber Bragg grating sensors embedded in CFRP laminates", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.33, 7, pp 991-999, 2002.
- [2] B. Qi , M. Bannister, X. Liu, A. Michie, L. Rajasekera , B. Ashton, "Response of an embedded fibre bragg grating to thermal and mechanical loading in a composite laminate", *Materials Forum*, Vol.27, pp 93-100, 2004.
- [3] E. Chehura, A. A. Skordos, C. Ye, S. W. James, I. K. Partridge, R. P. Tatam, "Strain development in curing epoxy resin and glass fibre/epoxy composites monitored by fibre Bragg grating sensors in birefringent optical fibre", 2005.
- [4] H. Kang, D. Kang, C. Hong, C. Kim, "Monitoring of fabrication strain and temperature during composite cure using fiber optic sensor", 2001.
- [5] P. P. Parlevliet, E. Voet, H. E. N. Bersee, A. Beukers, "Process monitoring with fbg sensors during vacuum infusion of thick composite laminates", *ICCM*, Japan, 2007.
- [6] L. Khoun, R. de Oliveira, V. Michaud, P. Hubert, "Measurement of process-induced strains by fibre bragg grating optical sensor in resin transfer moulding", *ICCM*, Edinburgh, 2009.
- [7] J. M. Balvers, H. E. N. Bersee, A. Beukers, "Settling of glass woven fabric in steel RTM mould: impact on residual stresses", 2009.
- [8] X. A. Aduriz, C. Lupi, N. Boyard, J. L. Bailleul, D. Leduc, D. Delaunay, C. Boisrobert, "Fibre optic sensors applied to resin transfer molding: a powerful way for in-situ quantitative control and optimization", *FPCM-9*, 2008.
- [9] M. Demirel, "Mesures in-situ et déportées des paramètres d'élaboration de pièces composites par capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg", Thèse de doctorat, 2009.
- [10] S. Vacher, "Capteurs à fibres optiques pour le contrôle de l'élaboration et la caractérisation mécanique des matériaux composites", Thèse de doctorat, 2004.
- [11] M. C. Emmons, S. Karnani, S. Trono, K. P. Mohanchandra, W. L. Richards, G. P. Carman, "Strain Measurement Validation of Embedded Fiber Bragg Gratings", *Int J Optomechatronics*, Vol.4, 1, pp 22-33, 2010.
- [12] G. Twigg, A. Poursartip, G. Fernlund, "Tool-part interaction in composites processing. Part I: experimental investigation and analytical model", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.35, 1, pp 121-133, 2004.
- [13] X. W. Shu, D. H. Zhao, L. Zhang, I. Bennion, "Use of dual-grating sensors formed by different types of fiber Bragg gratings for simultaneous temperature and strain measurements", *Appl Opt*, Vol.43, 10, pp 2006-2012, 2004.
- [14] J. Wei, M. W. Craig, T. Graham, K. Maria, C. Brian, "Simultaneous measurement of strain and temperature: error analysis", *Opt. Eng.*, 1997.